

FERROMÁGNESES ANYAGOK RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATA MÁGNESESHISZTERÉZIS-ALHURKOK MÉRÉSE ALAPJÁN

Vértessy Gábor
MTA TTK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet

Olyan új, gyorsan elvégezhető, megbízható és gazdaságos roncsolásmentes vizsgálati módszert fejlesztettünk ki, amely alkalmas a ferromágneses szerkezeti anyagokban bekövetkező változások ellenőrzésére. Az iparban alkalmazott ferromágneses anyagok roncsolásmentes vizsgálata nagyon időszerű probléma, amely az ipar számos ágát érinti. A feladat a vas- és acélipar alapvető termékeinek gyártás közbeni ellenőrzésével kezdődik és egészen a késztermékek használat közben történő rendszeres vizsgálatáig tart. Elsősorban olyan esetekről van szó, ahol a használat közben anyagkifáradás, megnyúlás, öregedés, termikus hatások, korrózió, sugárzás és egyéb káros folyamatok mehetnek végbe. Ide tartozik a csővezetékek, hidak, hajók, nyomástartó edények (és még sok egyéb) esetében a szerkezeti elemek élettartamuk alatt történő ellenőrzése, valamint az acélokban bekövetkező szerkezeti változások roncsolásmentes módon történő kimutatása a hengerléssel, sajtolással, darabolással történő anyagmegmunkálás során. A rendszeres, roncsolásmentes vizsgálatokkal megelőzhető a szerkezeti anyagok kifáradása miatt bekövetkező balesetek.

A mágneses módon elvégzett vizsgálatok egyszerűségük és gazdaságosságuk miatt tarthatnak számot a széleskörű érdeklődésre a fenti esetekben. Ezek a módszerek azon a tényen alapulnak, hogy az anyagok szerkezeti változásai és mágneses jellemzői között jól kimutatható kapcsolat van [1]. A mágneses tulajdonságok vizsgálatának egyik hatékony (de természetesen nem egyetlen) módja az anyag mágneseshisztérézis-görbéjének mérése. A hisztérézisgörbe a ferromágneses anyagok viselkedésének jellemzésére szolgáló, leggyakrabban használt paraméter. Ez az a zárt görbe vonal, amely megmutatja, hogy az anyagra ható (váltakozó nagyságú és irányú) H mágneses gerjesztő térerősség esetén hogyan változik a B mágneses indukció az anyagban [2]. A hisztérézisgörbe alakja, például a szélessége vagy a meredeksége érzékenyen követi a mágneses anyag szerkezetében bekövetkező változásokat. Ennek kimutatására számos olyan vizsgálati módszert alkalmaznak a gyakorlatban is, ahol szerkezeti anyagok hisztérézis-görbéjét közvetlenül mérik, és ebből vonnak le következtetéseket azok fáradására vagy egyéb, az anyagszerkezetben bekövetkező változásra [3].

Ezen módszerek hátránya azonban, hogy a mágneseshisztérézis-mérések sokszor csak nehezen valósíthatók meg, különösen, ha nagy méretű, szabálytalan alakú mérendő objektumról van szó, valamint csupán néhány, a hisztérézisgörbéből származtatható paraméter (telítési indukció, koercitív erő, remanencia stb.) mérésére van lehetőség. További hátrány, hogy ezen paraméterek megbízható méréséhez az anyagot mágnesesen telíteni kell, ami a nagy lemágnesezési

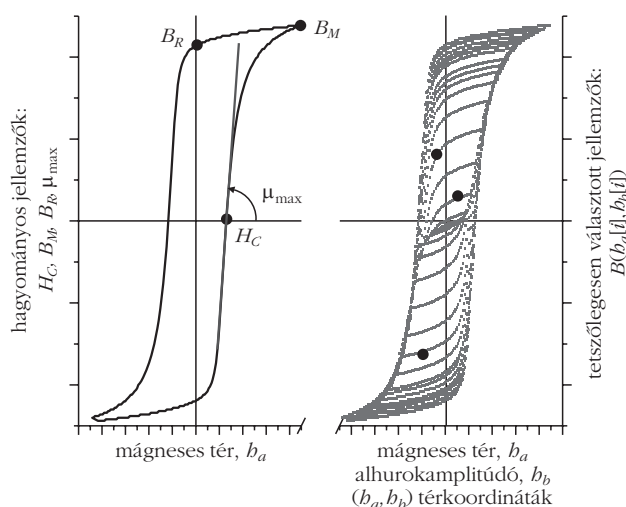
tényezőből adódó szórt mágneses tér miatt nagyon sok esetben nehéz, vagy egyenesen lehetetlen.

Jelen munkában egy olyan, az elméleti mágneseshisztérézis-modellezésen és -számításon alapuló mérés-technikát ismertetek, amelynek során a teljes hisztérézishurok mérése helyett a hisztérézis-alhurok sorozatának mérésével határozható meg az anyagtól függő paraméterek. Mint azt számos esetben kimutattuk, ez a módszer sok előnyt kínál a hagyományos hisztérézismérésekkel szemben [4], és általában is versenyképes az egyéb mágneses mérési technikákkal (például Barkhausen-zaj, magnetoakusztikus emisszió stb.).

Mágneses adaptív teszt (MAT)

Az elnevezés arra utal, hogy a mérési eljárás során mindig azokat a jellemzőket határozzuk meg, amelyek leginkább jellemzik a vizsgált anyagban a szóban forgó degradáció következtében kialakult változásokat. Vagyis a kiértékelést úgy optimalizáljuk, hogy a kapott paraméterek a legjobban adaptálhatók legyenek a megrendelőt érdeklő szerkezeti változásokra. Ez a mérési módszer jól kihasználja a korszerű számítástechnika lehetőségeit, és segítségével sokkal több információ származtatható, mintha csak a hisztérézishurok néhány kiválasztott paraméterét mérnénk. A MAT-eljárás lényege, hogy egy külső mágnesező járom segítségével szisztematikusan, lemágnesezett állapotból kiindulva, váltakozó mágneses térben, növekvő amplitúdóval mágnesezzük a mérendő mintát. A mérés során a minta permeabilitását (vagyis a válto-

1. ábra. A hagyományos, telítési hisztérézisgörbe (balra) és a hisztérézis-alhurok mérésén alapuló módszer (jobbra) közti különbség szemléltetése.



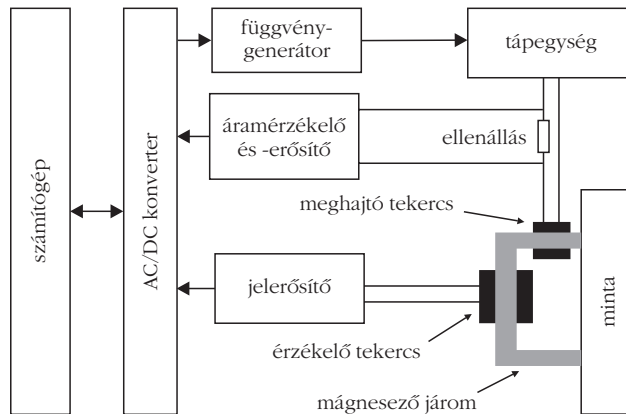
ző külső tér hatására a mintában bekövetkező mágnesesindukció-változást) detektáljuk a mágnesező járomon elhelyezett érzékelő tekercssel, és ebből számítjuk ki a hiszterézis-alhurkokat. A hagyományos, a telítési hiszterézisgörbe mérésén alapuló, és az általunk bevezetett, a hiszterézis-alhurkok mérésén alapuló módszer közti különbséget mutatja az 1. ábra.

A teljes görbe mérése során általában a telítési indukciót (B_M), a remanens mágnesezettséget (B_R) és a koercitív erőt (H_C), néha a maximális permeabilitást (μ_{\max}) határozzák meg. Ezen fizikai jellemzők jelentését az 1. ábra mutatja. A módszer hátránya, hogy ezek a paraméterek függnék a telítési mágnesező tértől. A MAT-eljárás esetén viszont számos, jól definiált alhurkot mérünk, amelyek minden pontja hordozhat valamilyen információt. Vagyis akár több ezer vagy tízezer, jól reprodukálható, a megfelelő (h_a, h_b) térkoordinátákkal és az ezekhez tartozó $B(h_a, h_b)$ mágneses értékekkel jellemzett mérési pont is a rendelkezésünkre áll, amelyek közül egy erre a célra kifejlesztett szoftver segítségével választjuk ki azokat, amelyek a legnagyobb érzékenységgel és egyúttal a legjobban reprodukálható módon jellemzik az anyagban bekövetkező változást a megadott független változó (például mechanikai deformáció) függvényében. A $B(h_a, h_b)$ értékeket a mért permeabilitásgörbe alapján számítjuk ki. A szemléltetés kedvéért a 3. ábrán bemutatom, hogy egy mintasorozat a közvetlenül mért permeabilitásgörbék hogyan változnak az anyagban végbemenő degradáció (jelen esetben hengerlés) következtében.

A későbbiekben használt, „optimális MAT-paraméter”-nek nevezett jellemzőket a mért permeabilitás görbéből számolt $B(h_a, h_b)$ értékek halmazából úgy határozzuk meg, hogy az összes $B(h_a, h_b)$ pontot feldolgozzuk a külső, független változó (deformáció, keménység stb.) függvényében, és ebből választjuk ki azokat, amelyek a külső hatásokra változó anyagi tulajdonság és az arra legérzékenyebb hiszterézis-alhurkok-csoporthoz tartoznak. Értelemszerűen nemcsak egy ilyen $B(h_a, h_b)$ paraméter van, és a mérést akkor tekintjük megbízhatónak és reprodukálhatónak, ha egy viszonylag széles (h_a, h_b) tartományból az egymást követő mérési pontok csak kis mértékben különböznek egymástól. Ebben az esetben a megismételt mérés is ugyanazt, vagy hibahatáron belül hasonló $B(h_a, h_b)$ értéket eredményez, még ha a h_a illetve h_b értékeket nem is sikerül pontosan reprodukálni.

A mérés nem abszolút, mindig a hasonló mérési paraméterekkel felvett referencia méréssel hasonlítjuk össze (általában arra normáljuk) a mintasorozat adott elemén mért azonos paramétereket. Így egy mérési sorozat jól mutatja, hogyan változik az aktuális minta mágneses viselkedése a deformáció mértékével arányos módon. Ismeretlen mintán történő mérés esetén előzőleg fel kell venni a kalibrációs görbét egy ismert (referencia) mintasorozaton.

Az eljárás jelentős előnye még, hogy az anyagot nem kell mágnesesen telíteni: a lemágnesezett állapot környékén mért hiszterézis-alhurkok sorozatából is tökéletesen és nagy érzékenységgel jellemezhető az anyag-

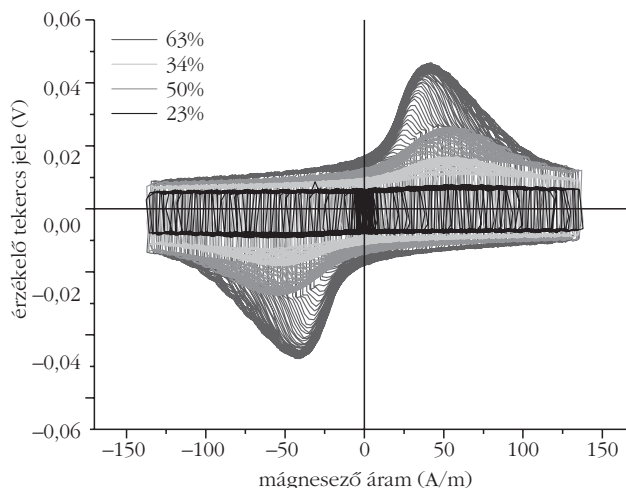


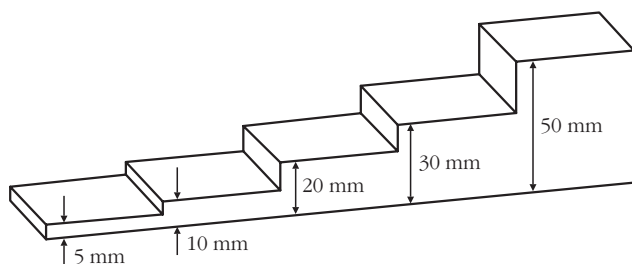
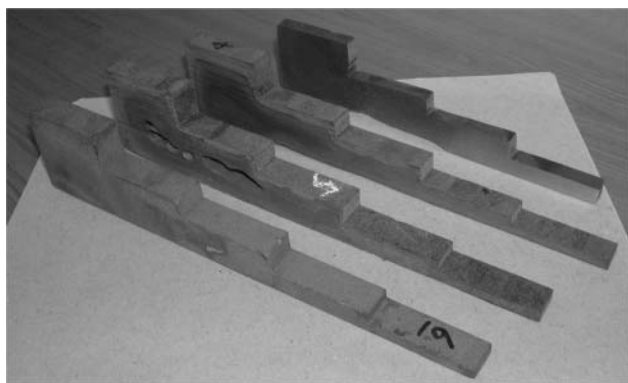
2. ábra. A mérési elrendezés blokkvázlata.

ban végbemenő változás. A módszer részletesebb leírása, számos gyakorlati példával illusztrálva a [4] hivatkozásban szerepel. A 2. ábrán látható a mérési elrendezés blokkvázlata. A minta felületére helyezett, lágymágneses anyagból készült mágnesező járomra tekercselt meghajtó tekercsen átvezetett áram segítségével periodikusan mágnesezzük a mintát, és az ennek hatására az egész mágneses körben (amelynek a minta is része) generált mágnesesindukció-változást mérjük az érzékelő tekercs (amely szintén a mágnesező járomon helyezkedik el) segítségével. A tekercsben indukált feszültség az időfüggő mágneses gerjesztés miatt változó indukció időderiváltjával arányos. Az érzékelő tekercs jele látható (a mágnesező áram függvényében) egy hidegen hengerelt rozsdamentes acél mintasorozat négy eleme esetén a 3. ábrán. (A mérésről magáról később szó lesz a hideghengerléssel alakított rozsdamentes acél mintákon kapott eredményeket ismertető alfejezetben.) Az ábra egyúttal mutatja magát a mérési folyamatot is, jól láthatók a különböző alhurkokon a folyamatosan növekvő mágnesező térrel detektált jelek.

A jelen munkában – mintegy illusztrálva a fent elmondottakat – a MAT-módszer segítségével, különféle mintákon elvégzett mérések eredményét foglalom össze. A kiértékelés során a MAT-paramétereket összeha-

3. ábra. Az érzékelő tekercs jele a mágnesező áram függvényében négy különböző mértékben hengerelt rozsdamentes acél minta esetén.





4. ábra. A lépcső alakú öntöttvas minták.

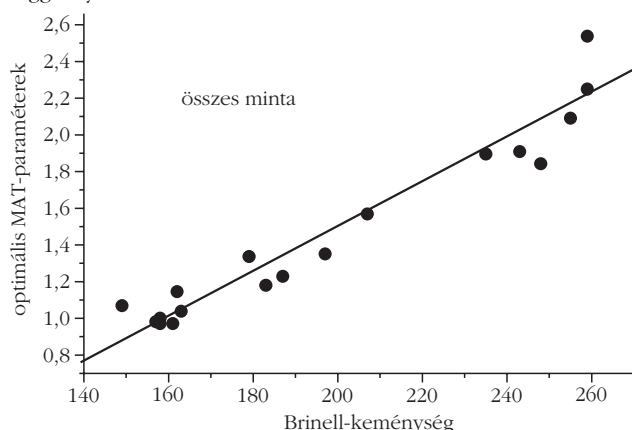
sonlítottam az ugyanazon mintasorozaton, független, roncsolásos módon mért paraméterekkel. Ezek a paraméterek (keménység, átmeneti hőmérséklet vagy Charpy-teszt) a szabvány szerint mérendő jellemzők, amelyeket előírás szerint rendszeresen mérni kell a nagy igénybevételnek kitett szerkezeti elemeken.

Öntöttvas minták mérése

Megfelelő formába történő öntéssel négy, speciális, lépcső alakú öntöttvas minta készült. A minták alakja és a lépcsők vastagsága a 4. ábrán látható, míg kémiai összetételüket az 1. táblázat tartalmazza. A különböző vastagságú lépcsőkbe történő beöntés során az olvadt vas különböző idő alatt hűl le, emiatt szerkezete is különbözik.

Metallurgiai vizsgálatok igazolták, hogy a különféle vastagságú lépcsők szerkezete jelentős mértékben különbözik egymástól (perlit-, ferritarány, grafit szemcsék

5. ábra. Öntöttvas mintákon mért MAT-paraméterek a keménység függvényében.

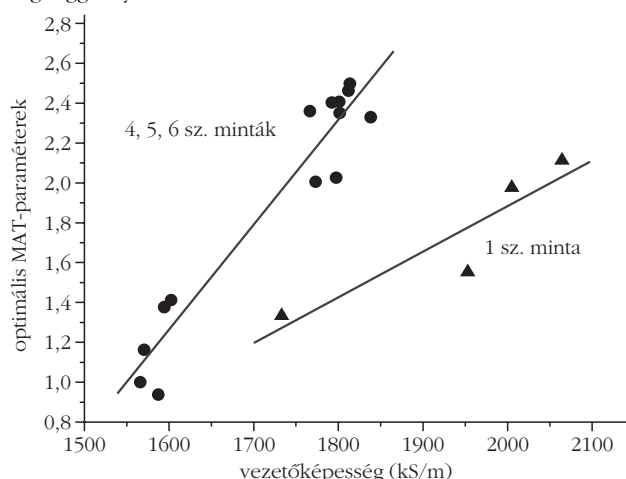


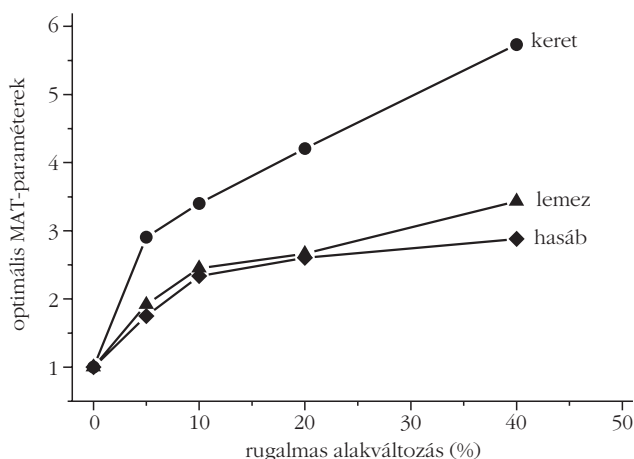
1. táblázat						
Öntöttvas minták kémiai összetétele (súlyszázalékban)						
minta	C	Si	Mn	P	S	Mg
1	3,05	2,041	0,166	0,049	0,016	0,024
4	3,58	2,592	0,127	0,065	0,016	0,025
5	3,46	2,575	0,128	0,066	0,015	0,025
6	3,43	2,523	0,130	0,064	0,016	0,026

nagysága stb.). Mind a négy minta mindegyik lépcsőjén végeztem mágneses méréseket a MAT-módszerrel. Az így kapott eredményeket összehasonlítottam a független laboratóriumban elvégzett keménység- (Brinell) és elektromos vezetőképesség-mérések eredményével. Mint korábban említettem, az alábbiakban bemutatott mérésekben a MAT-eljárás során mindig kiválasztottam a kapott adathalmazból azokat a paramétereket, amelyek az adott független paraméter (például keménység) változását a legnagyobb érzékenységgel, de ugyanakkor a legjobb reprodukálhatósággal írják le. A továbbiakban az így meghatározott jellemzőt, mint optimális MAT-paramétert fogom említeni.

A 5. és 6. ábra mutatja a mérések eredményét. Az 5. ábrán az összes minta összes lépcsőjén mért MAT-paraméter szerepel a Brinell-keménység függvényében. Látható, hogy az adatok kis szórással egy egyenes mentén helyezkednek el, vagyis jó korrelációt sikerült kapni a mágneses paraméterek és a keménység között. A 6. ábrán, ahol a vezetőképesség függvényében szerepelnek a MAT-paraméterek, kétféle függés különíthető el. A 4., 5. és 6. számú mintákon mért értékek egy egyenes mentén fekszenek, míg az 1. számú minta esetén ettől jelentősen eltérő meredekséget kapunk. A különbség a kémiai összetétel alapján értelmezhető: a 4., 5., 6. számú minták összetétele nagyon közel van egymáshoz, míg az 1. minta markánsan különbözik a többi mintától, mint az az 1. táblázatból látható. Ez okozza a vezetőképességben mért nagyobb értékeket, amelyek jól követhetők a mágneses mérésekkel is.

6. ábra. Öntöttvas mintákon mért MAT-paraméterek a vezetőképesség függvényében.



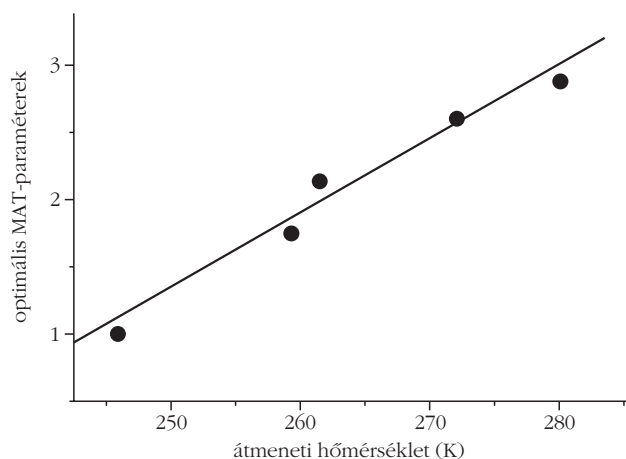


7. ábra. Optimalizált MAT-paraméterek a rugalmas alakváltozás függvényében hideghengerléssel alakított különböző alakú szénacél minták esetében.

Szénacél minták mérése

Alacsony széntartalmú acél (0,16% szén, 0,20% szilíciumot és 0,44% mangánt tartalmazó) mintasorozatot vizsgáltam. Az anyagot hideghengerlés segítségével plasztikusan deformáltuk ($\epsilon = 0, 5, 10, 20$ és 40%), majd az így módon deformált acélból megfelelő alakú darabokat vágunk ki. Három különböző alakú mintát, keret formájút, lemezt, illetve hasábot készítettünk. A lemezt és a hasábot a 2. ábrán bemutatott módon, vagyis külső mágnesező járommal mágnesztük, míg magára a keretre cséveltük a mágnesező és érzékelő tekercseket. Ez utóbbi geometria biztosítja csak a „tökéletes” mágneses mérést, mert nem kell számolni a minta alakjából adódó lemágneszési effektussal, valamint a járom és a minta közötti légrés hatásával. Valamennyi hasáb egyik oldalán egy „V” alakú bemetszést alakítottunk ki, amely az úgynevezett Charpy-teszt elvégzését teszi lehetővé. (Ez a teszt a nukleáris iparban rutinszerűen elvégzett roncsolásos mérés, ami azt mutatja, hogy az anyag mennyire lesz törékeny, például neutronbesugárzás hatására. Eredménye az úgynevezett átmeneti hőmérséklet, ami az anyag ridegtörési érzékenységét jellemzi. Az atomreaktorok nyomásálló tartályának megbízhatóságát így módon ellenőrzik.) Elvégeztük a Charpy-tesztet, valamint Vickers-keménységet is mértünk valamennyi mintán. Transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatokat is végeztünk, ami kimutatta a mikroszerkezet változását: a diszlokáció-sűrűség 10^9 -ról 10^{10} cm^{-2} értékre nőtt a hengerlés hatására, ami megfelel a deformált anyag mechanikai és mágneses keményedése során megfigyelt és elvárt értéknek.

A mérések eredménye azt mutatja, hogy a minta alakjától függetlenül a MAT-mérések során meghatározott optimális mágneses jellemző (MAT-paraméter) és a rugalmas deformáció között jól kimutatható kapcsolat van. Ezt a mérési eredményt mutatja a 7. ábra. Az ábra alapján levonható fontos következtetés, hogy a minta alakja, és az, hogy mágnesesen nyitott vagy zárt kört mérünk, *kvalitatíven* nem befolyásolja a kapott eredményt, vagyis az anyag degradációja és a

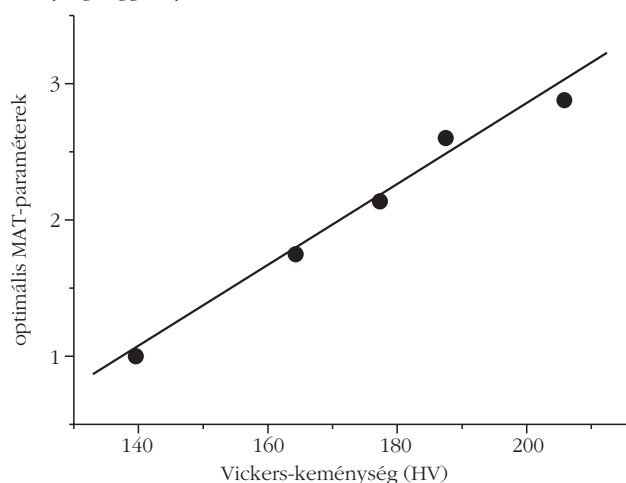


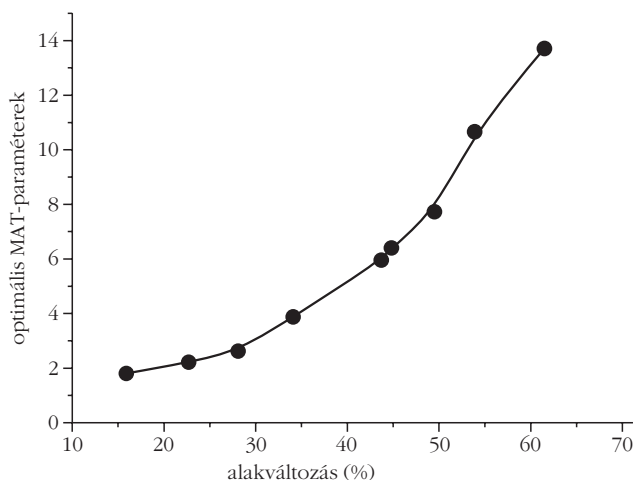
8. ábra. A szénacél mintákon mért MAT-paraméterek az átmeneti hőmérséklet függvényében.

mért mágneses jellemző közötti összefüggést. Ez a tény a jövőbeni ipari alkalmazást nagymértékben elősegíti. Ugyanis a külső járommal történő mágnesezés során mindig fellép a légrés hatása, ami módosítja (néha akár jelentősen is) a mért jelet. Mágneses szempontból abszolút mérést csak zárt mágneses körben (gyűrű, vagy keret alakú mintán) lehet végezni, de ez értelem szerűen nem tehető meg a gyakorlati szempontból fontos esetekben. A 7. ábrán látható eredmény viszont azt mutatja, hogy a kapott összefüggés *jellege* nem változik, ha ugyanazokon a mintasorozatokon zárt vagy nyitott körben történik a mérés.

A roncsolásmentesen mért mágneses MAT-paraméterek és a hagyományosan, roncsolásos módon meghatározott Vickers-keménység, valamint az átmeneti hőmérséklet között egyértelmű, nagyon szabályos, lineáris kapcsolatot mutattam ki a mérési pontok kis szórása mellett. Ezen mérések eredményei láthatók a 8. és 9. ábrákon. Ennek alapján biztos állítható, hogy a vizsgált anyagokban bekövetkező mechanikai degradációra közvetlen, kvantitatív adatot tudunk szolgáltatni roncsolásmentes méréssel, ha a mérést először egy ismert mintasorozaton kalibráljuk, és az ismeretlen mintán végzett mérést ezzel a referenciaadattal vetjük össze.

9. ábra. A szénacél mintákon mért MAT-paraméterek a Vickers-keménység függvényében.





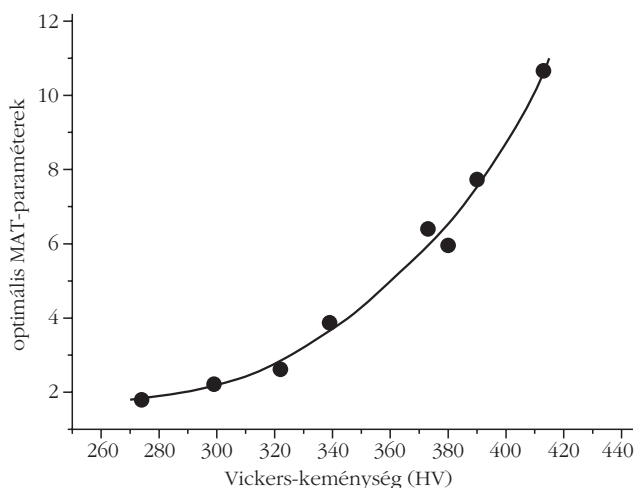
10. ábra. 18/8 típusú, titánnal stabilizált ausztenites acél mintákon mért MAT-paraméterek az alakváltozás függvényében.

Említést érdemel még az a körülmény, hogy míg a vizsgált mintasorozat esetén az átmeneti hőmérsékletben mintegy 20%, a Vickers-keménységben mintegy 50%-os változás következett be, a mágneses jellemzők mintegy 270%-kal változtak, még a legkedvezőtlenebb esetben is (hasáb alakú minta). Vagyis a mágneses mérés segítségével a bekövetkező szerkezeti változások jóval nagyobb érzékenységgel mutathatók ki, mint a roncsolásos mérések segítségével.

Rozsdamentes acél minták mérése

Lemez formájú, 18/8 típusú, titánnal stabilizált ausztenites acél mintákat 1100 °C-os hőkezelésnek vetettünk alá, majd a mintákat vízfürdőben edzettük. Ezután hideghengerléssel különböző mértékben alakítottuk őket. Az anyag az eredeti paramágneses fázisból fokozatosan részben ferromágnessé vált, mert a hengerlés mértékének függvényében ferrittartalom alakult ki. A 3. ábrán jól látható, hogy a növekvő ferrittartalom milyen jól tükröződik a mért jelalakban. Az ábrán négy különböző módon hengerelt mintán

11. ábra. 18/8 típusú, titánnal stabilizált ausztenites acél mintákon mért MAT-paraméterek a Vickers-keménység függvényében.



mért jel látható. Minél erősebb a minta deformációja, annál nagyobb a ferromágneses fázis aránya, és annál nagyobb a mérhető permeabilitás.

A 10. ábrán látható az optimális MAT-paraméterek függése az alakváltozástól. 60%-os alakváltozás a mágneses jellemzők mintegy 14-szeres változását okozza, ugyanakkor a Vickers-keménységben ez csak 55% növekedést jelent, amint az a 11. ábrán látható. Vagyis a rugalmas deformáció hatására kialakuló ferromágneses fázis jelenlétét igen jó érzékenységgel lehet ilyen módon detektálni, és a mérési pontok szórása is kicsi. Néhány százalékos ferrit tartalom vagy ferrit tartalom változás is kimutatható a mérési hibahatáron belül.

Összegzés, következtetések

A többféle mintán elvégzett mérések eredményét összegezve megállapítható, hogy az általunk bevezetett új, mágneseshisztérézis-mérésen alapuló módszer jó eredményeket ad, segítségével nagy érzékenységgel és megbízhatóan jellemezhetők a ferromágneses anyagokban bekövetkező szerkezeti változások. Valamennyi anyag esetén, ahol rendelkezésre álltak ilyen adatok, igen jó egyezés mutatható ki a hagyományos módon, roncsolással végzett mérések eredménye, valamint a roncsolásmentesen elvégzett mágneses mérések eredménye között.

Figyelemre méltó, hogy a mágneses alhurkok mérésének megfelelő kiértékelésével kapott optimális mágneses jellemző az alkalmazott mágneses tér olyan értékeinél adódott, ami messze van az anyag mágneses telítettségétől. A gyakorlatban sűrűn előforduló, nagy méretű szerkezeteken végzendő mérések esetén ez igen fontos körülmény, mert ezek a mintadarabok mágnesesen nem telíthetők.

Megítélésem szerint ezért jó esély van arra, hogy a ferromágneses anyagból készült szerkezeti elemek rendszeres megbízhatósági ellenőrzését, maradvélettartam becslését roncsolásmentesen végezhető mágneses mérésekkel végezzük el. A módszer sikeres jövőbeli alkalmazásához először természetesen minden esetben hagyományos, roncsolásos mérésekre van szükség mintasorozaton, amely alapján a MAT-mérések „taníthatók”. Ezen tanulási folyamat alatt kell meghatározni azokat a MAT-paramétereket, amelyek a legjobban jellemzik az illető anyag degradációját, és amelyek a jövőbeli mérésekben a legérzékenyebbek és legmegbízhatóbbnak minősülnek.

Irodalom

1. D. C. Jiles: Review of Magnetic Methods for Nondestructive Evaluation. *NDT Int.* 21 (1988) 311–319.
2. Kovács E., Paripás B.: *Fizika II.* Miskolci Egyetem Földtudományi Kar, 2011. vagy: www.uni-miskolc.hu/~www_fiz/KovacsE/EAeldin.pdf
3. C. C. H. Lo, et al.: Evaluation of fatigue damage using a magnetic measurement technique. *IEEE Trans. Mag.* 35 (1999) 3977.
4. I. Tomáš, G. Vértessy: Magnetic Adaptive Testing. In *Nondestructive Testing*. (Editor M. Omar), InTech-d.o.o. – Open Access publisher: www.intechopen.com/articles/show/title/magnetic-adaptive-testing, ISBN 979-953-307-487-9 (2012) 145–186.